

于泓, 王登红, 于扬, 等. 国内外主要沉积型锂矿分布及勘查开发现状[J]. 岩矿测试, 2019, 38(3): 354 – 364.
YU Feng, WANG Deng – hong, YU Yang, et al. The Distribution and Exploration Status of Domestic and Foreign Sedimentary – type Lithium Deposits[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(3): 354 – 364. 【DOI: 10. 15898/j. cnki. 11 – 2131/td. 201901180013】

国内外主要沉积型锂矿分布及勘查开发现状

于泓^{1,2}, 王登红^{2*}, 于扬², 刘铸³, 高娟琴^{1,2}, 仲佳爱^{2,3}, 秦燕²
(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
2. 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
3. 四川省地质矿产勘查开发局四零五地质队, 四川 都江堰 611830)

摘要: 随着近几年全球锂矿资源消耗的增加, 世界各地掀起了锂矿找矿热。现阶段世界上开发利用的锂矿主要有三种类型: 卤水型、伟晶岩型和沉积型, 其中沉积型锂矿由于储量巨大, 具有重要的地质意义和经济价值。现已发现的沉积型锂矿床主要分布在北美洲, 少数分布在南美洲和欧洲, 矿石主要以黏土矿为主。本文综述了全球主要沉积型锂矿的勘查开发现状, 介绍了北美洲、南美洲、欧洲、亚洲典型的沉积型锂矿以及我国伴生沉积型锂矿矿物特点, 有助于对我国沉积型锂矿床的勘查提供启示。对川东黄金口地区钻孔 ZK001 和钻孔 ZK601 中的岩心进行了连续取样, 共采集 196 个样品, 应用电感耦合等离子体质谱法分析测定其中的元素含量, 研究锂的富集特征和沉积环境。研究结果揭示了锂元素主要富集在嘉陵江组的硬石膏和雷口坡组的碳酸盐岩中, 含量最高可达 103. 25 μg/g。这种富集可能是由于沉积环境变化和物源改变双重作用的结果, 但具体的物质来源以及锂的赋存状态尚不清楚, 有待进一步研究。此发现为四川盆地沉积型锂矿的勘查提供重要线索, 也为进一步研究锂元素的来源、运移、富集及赋存状态提供了依据。

关键词: 沉积型锂矿; 锂矿化线索; 富锂黏土; 勘查开发现状; 黄金口

要点:

- (1) 综述了国内外主要沉积型锂矿的勘查开发现状。
- (2) 揭示了川东黄金口雷口坡组和嘉陵江组高锂地层的锂元素含量特征。
- (3) 锂元素富集可能是由于沉积环境变化和物源改变双重作用的结果。

中图分类号: P578. 1; P588. 22 文献标识码: A

锂是一种重要的金属矿产, 不但是重要的战略矿产资源, 也是当代社会经济持续发展的关键矿种之一, 可为解决我国乃至世界的能源危机、环境保护等瓶颈问题发挥重要作用^[1]。锂作为 21 世纪的能源金属, 已经受到了越来越广泛的重视^[2], 尤其是近几年来新能源汽车、锂电池等行业的飞速发展使得世界各国锂矿资源需求量大大增加。全球各厂商纷纷建立自己的锂电池工厂, 其中最著名的就是美国特斯拉 (Tesla) 公司的超级电池工厂

(Gigafactory)。美国、加拿大、澳大利亚等国的矿业公司也加大了锂矿的勘探力度。

在自然界发现的锂矿床中, 卤水型、伟晶岩型和沉积型是三种最主要的矿床类型^[3]。卤水型锂矿床属于外生型锂矿床, 可以分为地下卤水型和盐湖卤水型两种^[4], 锂主要以可溶解的离子形式存在。伟晶岩型锂矿属于内生型锂矿床^[5], 锂主要赋存于锂辉石、锂云母等矿物中。沉积型锂矿床最早是指产于沉积岩中的、尚不具备独立工业开采价值而具

收稿日期: 2019 – 01 – 18; 修回日期: 2019 – 03 – 17; 接受日期: 2019 – 04 – 09
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0602705, 2017YFC0602701); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160055, DD20160056, DD20160346)
作者简介: 于泓, 硕士研究生, 地球化学专业。E – mail: yufeng0214@foxmail. com。
通信作者: 王登红, 博士, 研究员, 主要从事矿产资源研究。E – mail: wangdenghong@vip. sina. com。

有市场潜力的锂矿。由于大多数沉积型锂矿品位低,一般没有锂矿物(锂可能以吸附或者类质同象方式赋存于黏土矿物中)而没有大规模开采,没有成为主流锂矿。但自从 2012 年塞尔维亚贾达尔(Jadar)盆地的含锂矿物羟硼硅钠锂石(Jadarite)被发现以来,沉积型锂矿也具有了独立开发的可能^[3]。随着近几年对于锂矿床勘探力度的加大,全世界越来越多锂含量高、具有独立开发价值的黏土型锂矿被发现,使得黏土型锂矿成为了沉积型锂矿的一个重要分支。

目前,沉积型锂矿的开发利用程度不高,除了贾达尔(Jadar)之外,大部分处于勘探阶段,没有实际生产,因此勘探程度直接影响了现阶段已经发现的沉积型锂矿的分布。世界上现阶段发现的独立的沉积型锂矿主要分布于北美洲和南美洲,其次是欧洲,其他地区报道较少。其主要矿体是富锂的凝灰岩和黏土,回收锂的方式以硫酸常压淋滤、浸出为主,回收的产品主要是碳酸锂(Li_2CO_3),回收率可达 80% 以上。我国尚没有独立开发利用的沉积型锂矿,多数与铝土矿、煤伴生,尚未得到利用。但随着开采技术的进步以及近年来国外对沉积型锂矿床的陆续发现,我国的沉积型锂矿也有望受到更多的关注。

本文评述了北美洲、南美洲、欧洲等国家沉积型锂矿床和我国伴生沉积型锂矿床的资源开发现状和锂含量特点,并分析了川东黄金口地区发现的锂矿化线索,以期对我国勘查此类锂矿有所启发。

1 北美洲的沉积型锂矿

美国特斯拉公司(Tesla)的一号超级工厂(Gigafactory1)位于美国的内华达州,靠近克莱顿谷(Clayton Valley)。该公司在克莱顿谷设立了北美洲唯一的商业化生产锂的项目,但随着特斯拉超级工厂的扩建、产能的提高,对于锂的需求量也在不断扩大。在此契机下全球许多矿业公司都在周边进行了大量的锂矿勘查工作,发现了许多的锂矿床,其中大部分属于沉积型。

1.1 克莱顿谷(Clayton Valley)地区

克莱顿谷位于美国内华达州埃斯梅拉达县中南部、拉斯维加斯西北 190 英里处。该地区植被稀疏,以灌木为主,全年最高(35℃)和最低气温(-8℃)分别出现在 8 月和 12 月。年均降水量 182mm,其中降雪量 70mm,年蒸发量超过 1270mm,最大值出现在 5 月^[6]。克莱顿谷是一个开放的山谷,东西高,南北低,环以崎岖的丘陵和山脉。现阶段开采的主要

是地下卤水中的锂,自 1966 年以来一直在生产。已发现的含锂卤水层从原来的 1 个已经增加到 7 个^[7],卤水中锂的浓度为 150~200mg/L。现有多家企业正在进行勘探,如:Pure Energy Minerals、LiTHIUM-X、Albemarle、Cypress Development 等公司,其中 Cypress Development 公司在该地区发现了高锂含量的黏土层^[8]。含蒙脱石的黏土岩全岩矿化,厚度至少有 120m。硫酸的淋滤试验表明,用弱酸对黏土岩进行浸泡,2~8 小时内可以释放 80% 的锂。截至 2018 年 9 月,该公司的 23 个钻孔中有 21 个见矿,以 300μg/g 为边界品位,控制的矿石量为 8.31 亿吨,平均品位 867μg/g,约合 383.5 万吨碳酸锂;推测矿石量约 11 亿吨,平均品位 860μg/g,约合 512.6 万吨碳酸锂。Cypress Development 公司的设计生产规模为每年 2 万吨碳酸锂,按此规模计算每年消耗含锂 1012μg/g 的矿石 545.5 万吨,生产 40 年需要 2.19 亿吨矿石,远低于现有储量,因此该企业正在调整生产计划。

1.2 大桑迪(Big Sandy)地区

大桑迪位于美国亚利桑那州莫哈维县,地表主要由平坦的盆地沉积物覆盖。Hawkstone Mining 公司在该地区发现了绿色含锂黏土层^[9]。黏土层中包含方沸石和钾质蚀变带,厚约 10~25m,南北展布超过 11km,东西展布至少 2km。在 275m 长的探槽中,锂含量超过 900μg/g 的长度有 119m,其中,12m 平均锂含量 970μg/g,18m 平均锂含量 998μg/g,42m 平均锂含量 1073μg/g,18m 平均锂含量 1075μg/g,24m 平均锂含量 1160μg/g,5m 平均锂含量 2026μg/g。7 个浅钻中有 3 个锂含量超过 900μg/g,分别为 2983μg/g、3370μg/g、3150μg/g。该地区尚未有明确公布的资源量,但是根据美国锂业推测其资源量至少 30 万吨金属锂。

Hawkstone Mining 公司提供了一套完整的碳酸锂的回收流程(图 1)^[9],主要是将矿石和硫酸混合进行淋滤,然后将淋滤液逐级过滤,回收不同产品,最后滤出的液体通过离子交换可以提取纯度为 99% 的碳酸锂。世界其他地区回收黏土中锂元素的技术手段与之类似,即在常压下用不同浓度的硫酸对矿石进行淋滤,适当升温可以提高淋滤效率。

1.3 布罗克里克(Burro Creek)地区

布罗克里克位于美国亚利桑那州中西部,由 Zenith Minerals 公司开发运营。该地区的锂主要富集在黏土中。锂含量较高的黏土层近地表呈水平状展布。黏土层中也富含一定量的钾。2018 年 6 月 19

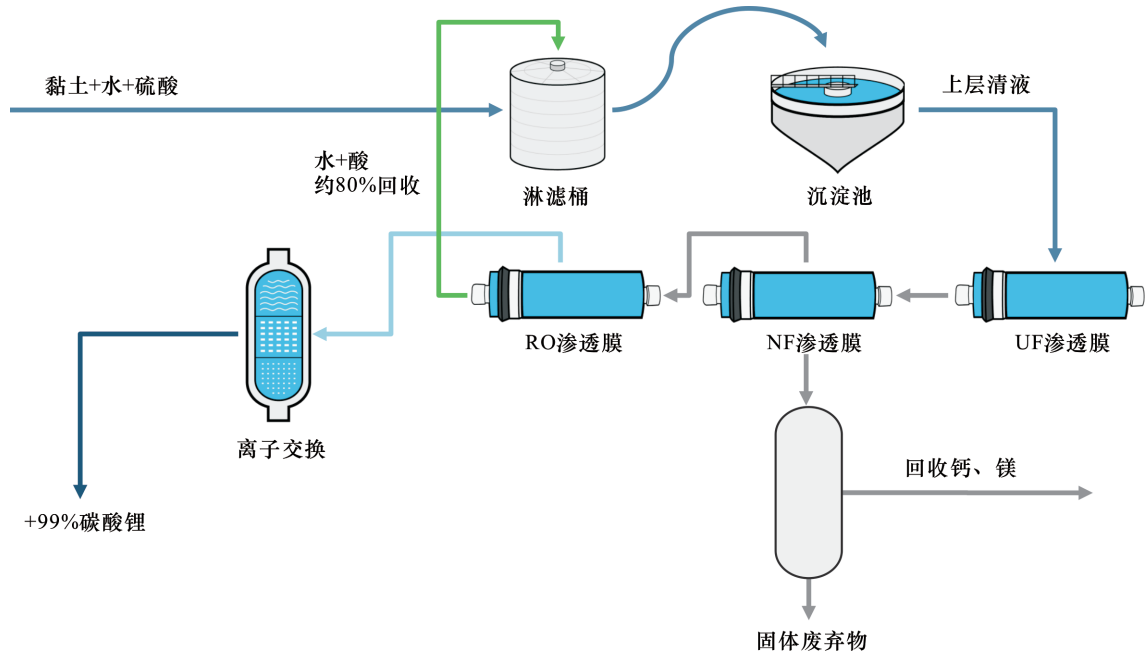


图1 沉积型锂矿石中回收碳酸锂的流程
Fig. 1 Flowchart of lithium carbonate recovery

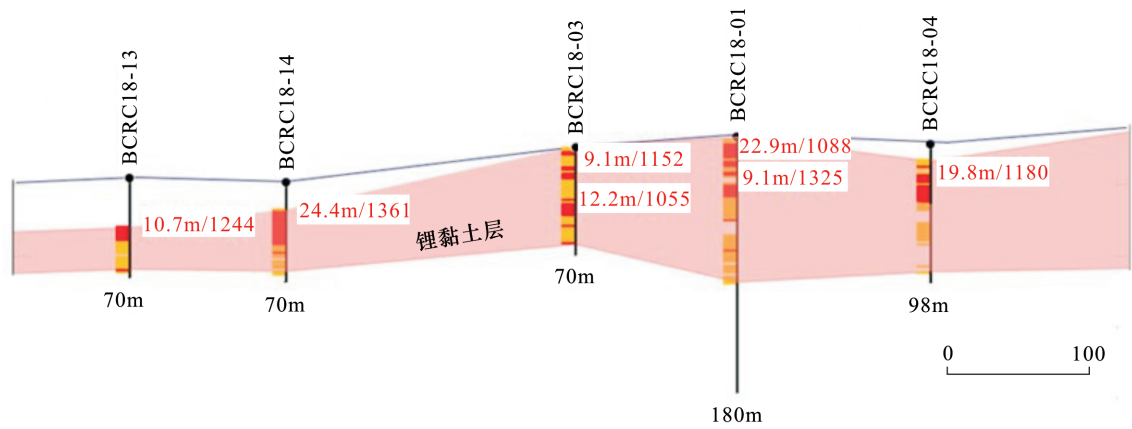


图2 布罗克里克锂矿区的勘探线剖面图
Fig. 2 Prospecting line profile map of Burro Creek

日,该公司公布了三个钻孔的见矿情况(图2)^[10]:以900 $\mu\text{g/g}$ 为边界品位,BCRC18-01钻孔从2.68m至25.58m,共见矿22.9m,锂平均品位1088 $\mu\text{g/g}$,从33.5m至42.6m共见矿9.1m,锂平均品位1325 $\mu\text{g/g}$;BCRC18-04钻孔从21.3m至41.1m,共见矿19.8m,锂平均品位1180 $\mu\text{g/g}$;BCRC18-14钻孔从19.7m至44.2m共见矿24.2m,锂平均品位1361 $\mu\text{g/g}$ 。以900 $\mu\text{g/g}$ 为边界品位,黏土矿层厚度为23~54m,矿石的密度1.6~1.8 g/cm^3 。据此估算的矿石储量约为3000~5000万吨,锂平均品位1000 $\mu\text{g/g}$,其中还含有2%~3%的钾,约合21万吨

碳酸锂以及5000万吨钾。

1.4 塔克帕斯(Thacker Pass)地区

塔克帕斯位于美国内华达州和俄勒冈州交界处。Western Lithium Corporation和Lithium American在此都有项目,前者称之为国王谷(Kings Valley)项目,后者则称之为塔克帕斯(Thacker Pass)项目。塔克帕斯项目位于一个名为McDermitt Caldera的古火山口内(图3)^[11-12],火山口呈椭圆形,南北长约40km,东西宽约30km,该火山口形成于16.30Ma以前,与黄石地幔柱热点有关。火山爆发后的几十万年中,水渗透入火山岩中将锂元素浸出并沉积在火

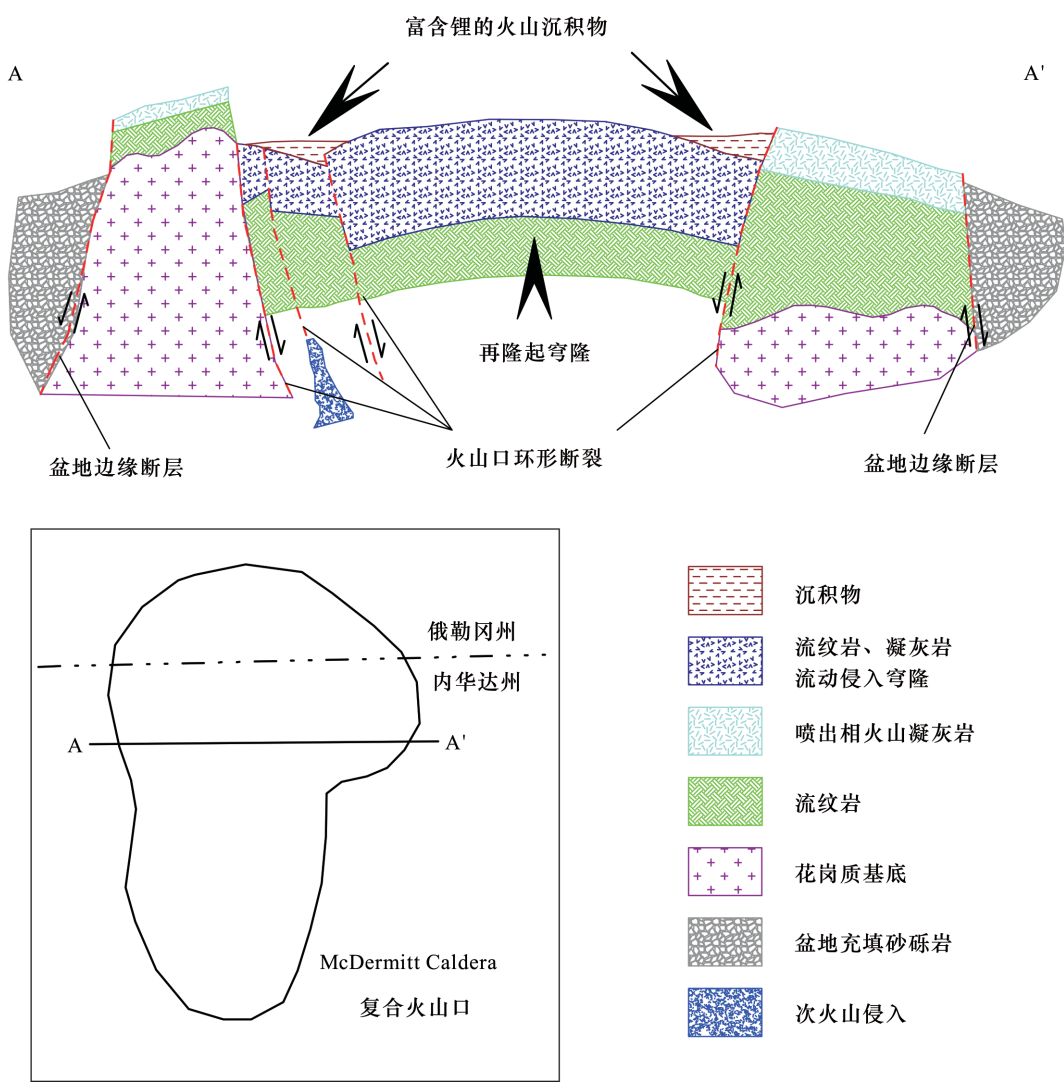


图 3 塔克帕斯 McDermitt Caldera 复合火山口剖面图
Fig. 3 Sectional view of McDermitt Caldera complex crater in Thacker Pass

山口盆地内,形成了一个火山口湖和一系列相关的湖泊沉积物。更新世的火山活动将火山口抬高,使得湖水被排出,将富含锂的沉积物带到了地表^[11]。

锂主要富集在黏土中,钻探结果表明黏土中的矿化十分均匀(图 4)^[13],可能意味着富锂黏土的形成与热液活动无关。富锂黏土层通常被冲积层覆盖,冲积物层平均厚度约 5m。上部黏土层以蒙脱石型黏土为主,锂含量达 4000 $\mu\text{g/g}$;较深层位则以伊利石型黏土为主,锂含量高达 9000 $\mu\text{g/g}$ 。2018 年 6 月公布:以 2500 $\mu\text{g/g}$ 为边界品位,估算的储量为 17942.2 万吨,平均品位 3283 $\mu\text{g/g}$,约合 313.5 万吨碳酸锂;以 2000 $\mu\text{g/g}$ 估算的资源量为 38526 万吨碳酸锂,平均品位 2917 $\mu\text{g/g}$,约合 598.2 万吨碳酸锂。

1.5 索诺拉(Sonora)地区

索诺拉项目位于墨西哥西部的索诺拉沙漠,美

国边境线以南 250km 处。锂主要富集在几个水平层状的黏土层中,平均厚度 20 ~ 40m^[14],地表露头延伸超过 6km,黏土中的锂蒙脱石是主要的含锂矿物。索诺拉盆地的地层主要为平坦的渐新世和中新世沉积物及沉积在浅盆地中的火山岩。黏土层覆盖于砂岩层上,底部为玄武岩,目前尚不清楚锂的来源和成矿的时间。截至 2017 年 5 月,共采集地表沉积物样品 148 件,其中 31 件锂含量超过 1000 $\mu\text{g/g}$ 。三个长度分别为 31m、25m、43m 的探槽揭示的锂含量分别为 949 $\mu\text{g/g}$ 、954 $\mu\text{g/g}$ 、928 $\mu\text{g/g}$ 。AF-17-01 钻孔,从 3m 开始矿层厚度超过 33m,平均品位 1058 $\mu\text{g/g}$;AF-17-02 钻孔,从 63m 开始矿层厚度超过 48m,平均品位 1031 $\mu\text{g/g}$;AF-17-03 钻孔,从 27m 开始矿层厚度超过 30m,平均品位 917 $\mu\text{g/g}$;AF-17-14 钻孔,从 0m 开始矿层厚度超过 24m,平

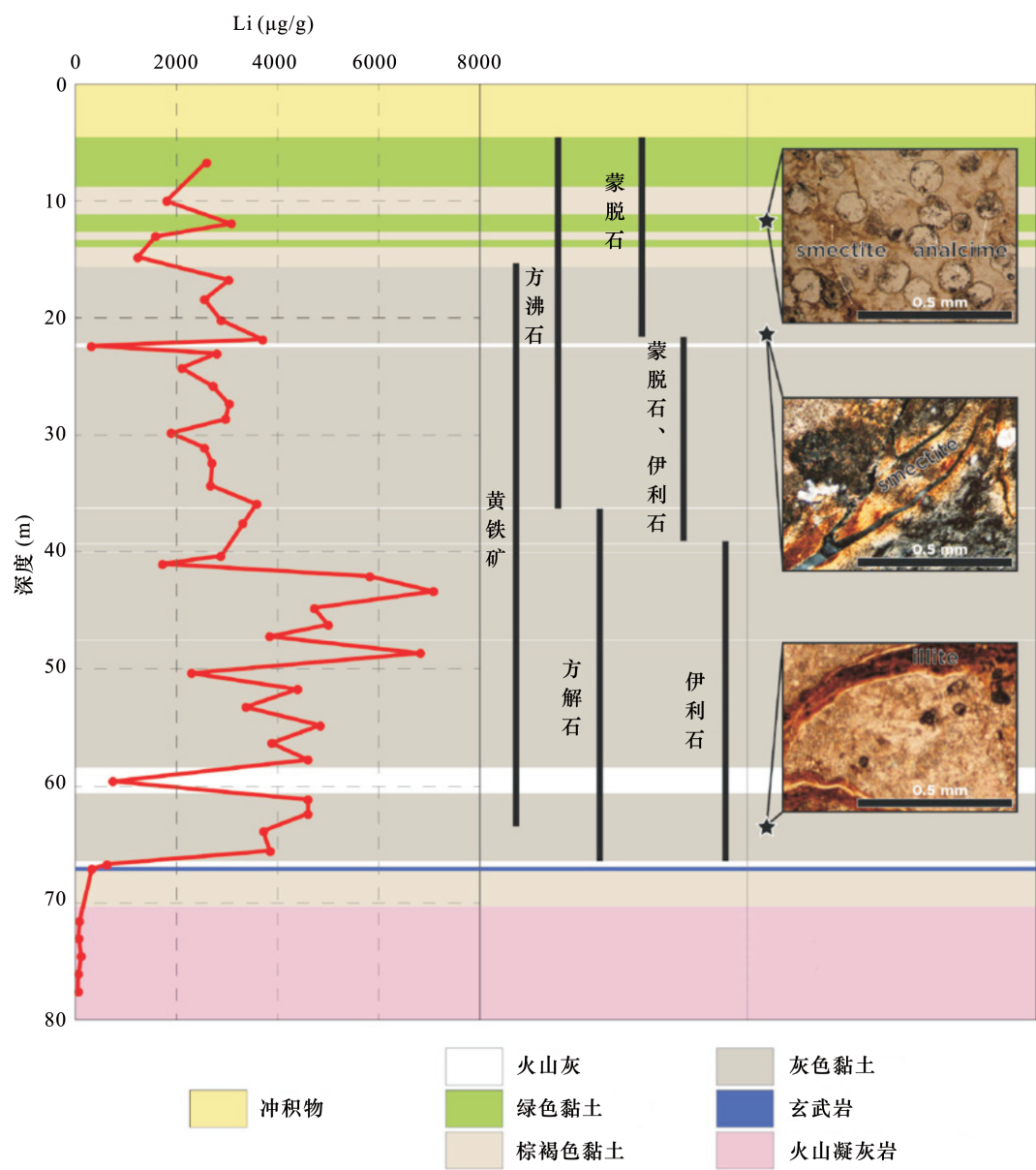


图4 塔克帕斯的岩性柱状图
Fig. 4 Lithological histogram of Thacker Pass

均品位 $1050\mu\text{g/g}$ 。以 $1500\mu\text{g/g}$ 为边界品位, 矿石储量 24380.8 万吨, 平均品位 $3480\mu\text{g/g}$, 约合 448.5 万吨碳酸锂。以 $1000\mu\text{g/g}$ 为边界品位, 锂矿石资源量 26800 万吨, 平均品位 $2650\mu\text{g/g}$, 约合 375.4 万吨碳酸锂^[15]。

2 南美洲的沉积型锂矿

伏尔肯尼 (Falchani) 地区位于秘鲁东南部, 由 Plateau Energy Metals 公司负责勘探开发^[16]。该区域属于最新发现的锂矿床, 到目前为止刚被发现 9 个月。锂元素主要富集在火山凝灰岩中, 凝灰岩的上下层为火山角砾岩, 火山角砾岩中也有较高含量

的锂。凝灰岩的厚度在 50m 以上, 平均锂含量为 $3500 \sim 4300\mu\text{g/g}$ 。以 $466\mu\text{g/g}$ 为边界品位, 矿石储量为 12200 万吨, 平均品位为 $2724\mu\text{g/g}$, 约合 174 万吨碳酸锂。

3 欧洲的沉积型锂矿

贾达尔 (Jadar) 位于塞尔维亚的洛兹尼察镇贾达尔盆地内, 盆地内主要由第三系中新统湖相和海相沉积物填充, 沉积于三叠系与白垩系盐层上, 主要岩性为页岩、粉砂岩、细砂岩和粗砂岩。目前中上部控制的矿体的水平投影形态为矩形, 下部矿体的水平投影形态为圆形, 矿体呈板状产出。目前控制的

矿体长度为 250 ~ 1000m,上部、中部、下部的矿层的厚度分别为 6 ~ 30m、8 ~ 38m、9 ~ 20m^[17]。该矿床的矿石为羟硼硅钠锂石 (Jadarite),化学式为 LiNaSiB₃O₇(OH)。这种矿物仅发现于贾达尔盆地,2006 年被国际矿物学协会正式确认为新矿物 (IMA2006-36)。截至 2018 年 5 月,共查明三氧化二硼(B₂O₃)资源量 2100 万吨,氧化锂(Li₂O)资源量 250 万吨^[18]。

4 亚洲的沉积型锂矿

4.1 蒙古 Khukh Del 地区

蒙古 Khukh Del 地区侏罗系的砂泥岩中含有较高含量的锂。蒙古碱金属公司(LLC)的勘探结果表明其 Li₂O 资源量约 92 万吨。侏罗系砂泥岩主要由方解石、白云石、黏土矿物以及少量碎屑矿物(石英、长石等)组成,部分层位含脉状黄铁矿。锂主要赋存于黏土中,粉晶 X 射线衍射结果显示黏土矿物为白云母。白云母中锂含量约为 1400μg/g,未达到工业品位,在目前的技术条件下暂无经济意义^[19]。

4.2 准格尔地区

到目前为止,中国还没有独立开采的沉积型锂矿床,多数与铝土矿和煤矿相伴生。伴生沉积型锂矿中锂的赋存状态直接关系到锂的提取^[20]。有研究表明,在 pH 较小的环境中,锂能够短期大量地从岩石中释放出来,形成高锂溶液^[21],随后主要以分散状态赋存于黏土矿物中,但尚未找到它们呈“离子”状态被吸附的证据^[22],因此对于锂的赋存状态尚不清楚^[23]。从伴生沉积型锂矿中提取锂,耗能高、投入高、产出低^[20],在其他类型锂矿利用成本较低的情况下,伴生沉积型锂矿难以利用,但随着锂资源需求的增加以及技术工艺水平的提高,伴生沉积型锂矿正逐渐受到人们重视。

我国与铝土矿、煤伴生的锂资源比较丰富,其中不乏含量较高、储量巨大的伴生沉积型锂矿。准格尔煤田位于晋、陕、蒙交界,属于华北地台。准格尔煤田主要开采的 6[#]煤,占整个煤田储量的三分之二,约 240 亿吨^[21],其中的锂元素含量为 147 μg/g^[24],按此计算,6[#]煤的锂远景资源量可达 352.8 万吨氧化锂。

4.3 宁武地区

宁武煤田位于山西省北部,主要含煤地层为上石炭统太原组,沉积于广阔的潮坪环境。有研究表明宁武煤田多个矿区的煤层中含有较高含量的锂。其中,安家岭露天矿区 9[#]煤中锂的平均含量为

229.89μg/g,最高为 840.09μg/g^[25];平朔矿区 4[#]煤中的锂含量平均为 128.27μg/g,最大值为 211.28 μg/g^[26];平朔矿区 9[#]煤中的锂含量平均为 166 μg/g^[27]或 152μg/g^[28]。平朔 9[#]煤的储量为 36.7 亿吨,其中金属锂的远景资源量就达到 55.8 ~ 60.9 万吨,约合氧化锂 119.5 ~ 130.5 万吨。

4.4 普安、晴隆地区

普安、晴隆煤矿区位于贵州省西南部,煤系地层主要为上二叠统,沉积于三角洲—潮坪、海陆过渡相。普安宏发煤矿的煤炭储量为 841 万吨,锂含量平均为 15.9μg/g,金属锂远景资源量 133.4 吨,约合氧化锂 285.9 吨;晴隆沙子镇镇煤矿的煤炭储量 4059 万吨,锂含量平均为 43.9μg/g,金属锂远景资源量 1780.5 吨,约合氧化锂 3815.5 吨;晴隆全力煤矿的煤炭储量 2035 万吨,锂含量平均为 19.6μg/g,金属锂远景资源量 398.7 吨,约合氧化锂 854.7 吨^[29]。

4.5 瓦厂坪、新民和新木—晏溪地区

瓦厂坪、新民和新木—晏溪 3 个铝土矿矿床位于务川—正安—道真(务—正—道)铝土矿集区,地处贵州北部与重庆接壤地带,已探明的铝土矿中伴生的氧化锂资源量大于 182 万吨^[22]。其中,中二叠统梁山组是该区重要的铝土矿含矿岩系。有学者对区内瓦厂坪、新民和新木—晏溪 3 个矿床梁山组含矿岩系的顶部、中部(铝土矿层)、底部及其上覆和下伏地层的锂元素含量进行了研究^[22],结果表明铝土矿石(铝土岩)、含矿岩系底部黏土岩、上覆栖霞组泥灰岩、下伏黄龙组灰岩、下伏韩家店组泥页岩中的锂元素平均含量分别为:725μg/g、428.69μg/g、10.5μg/g、6.93μg/g、32.5μg/g。

4.6 水江板桥地区

水江板桥铝土矿区位于重庆南部,该地区位于扬子陆块区川中前陆盆地、扬子陆块南部碳酸盐台地与上扬子东南缘被动边缘盆地内^[30]。水江板桥铝土矿伴生的锂主要富集在铝土矿含矿岩系的上部和中上部的高铝黏土岩,含量平均为 830.23μg/g。其中各类铝土矿矿石中锂含量由高到低依次为豆(鲕)砾状铝土矿石 > 砾屑铝土矿石 > 豆状铝土矿石^[31]。

4.7 大竹园地区

贵州大竹园铝土矿隶属于务川、正安和道真三县,毗邻重庆,是区内最具有代表性的铝土矿矿床。王登红等^[23]对 81 件钻孔岩心工程样品的分析,锂元素含量大于 260μg/g 者有 61 个样品,平均含量高

达 740.67 $\mu\text{g/g}$ 。部分钻孔锂含量大于 600 $\mu\text{g/g}$ 的连续矿层厚度可达数米。

4.8 黄金口地区

黄金口位于中国四川东北部的宣汉县。ZK001 和 ZK601 两个钻孔位于黄金口背斜上,地表直线距离 8.5km,深度均超过 3000m。两个钻孔中均发现了不同程度的锂元素富集。地表出露中生代陆相红色碎屑岩地层。其中,上三叠统须家河组、中上侏罗统沙溪庙组、遂宁组、蓬莱镇组及下白垩统苍溪组大片出露,厚度一般大于 3000m。须家河组为区域内分布稳定的含煤碎屑岩系,由砂、泥岩及煤层所组成,厚度一般小于 1000m;其上的侏罗、白垩纪地层岩性稳定,岩性基本相似,均为紫红、棕红等色的砂岩、粉砂岩及泥岩。ZK001 钻孔深度 3227m,自上而下贯穿了中侏罗统的下沙溪庙组、新田沟组;下侏罗统的自流井组;上三叠统的须家河组;中三叠统的雷口坡组,终孔于下三叠统嘉陵江组。ZK601 钻孔深度为 3602.38m,自上而下贯穿中侏罗统的上沙溪庙组、下沙溪庙组、新田沟组;下侏罗统的自流井组;上三叠统的须家河组;中三叠统的雷口坡组,终孔于下三叠统嘉陵江组。

两个钻孔的锂元素主要富集在三叠系雷口坡组的碳酸盐岩和嘉陵江组的硬石膏中。通过对比^[32]可知(表 1),两个钻孔砂岩类(砂岩、细砂岩、粉砂

岩)的锂元素含量与背景值相当,泥岩略高于背景值;碳酸盐岩中锂元素含量明显高于背景值,钻孔 ZK001 和 ZK601 分别是背景含量的 2.96 倍和 6.91 倍。钻孔 ZK001 和 ZK601 中硬石膏层的锂元素含量分别达到 103.25 $\mu\text{g/g}$ 和 43.19 $\mu\text{g/g}$ 。

表 1 不同岩性中锂元素含量对比

Table 1 Comparison of lithium content in different rocks or tectonic belts

锂资源地区	砂岩类 锂含量 ($\mu\text{g/g}$)	泥岩 锂含量 ($\mu\text{g/g}$)	碳酸盐岩 锂含量 ($\mu\text{g/g}$)	硬石膏 锂含量 ($\mu\text{g/g}$)
四川黄金口 ZK001 钻孔	36.48	61.49	31.57	103.25
四川黄金口 ZK601 钻孔	33.27	37.4	73.68	43.19
中国东部	28.5	38	9.5	—
内蒙兴安—吉黑造山带	24	29	7	—
华北地台	21	41	9.5	—
秦岭—大别造山带	26	46	14	—
扬子地台	24	36	10	—
华南褶皱系	37	34	14	—

Rb/Sr 值经常被用来反映物源的变化^[33-35],因为源区的物质组成是制约 Rb、Sr 在沉积地层中含量变化的主要因素。Sr/Ba 值是一个指示沉积相的很好的标志,可以用来区分海相沉积和陆相沉积^[36]。如图 5 所示,两个钻孔的 Sr/Ba 值的变化规律与锂

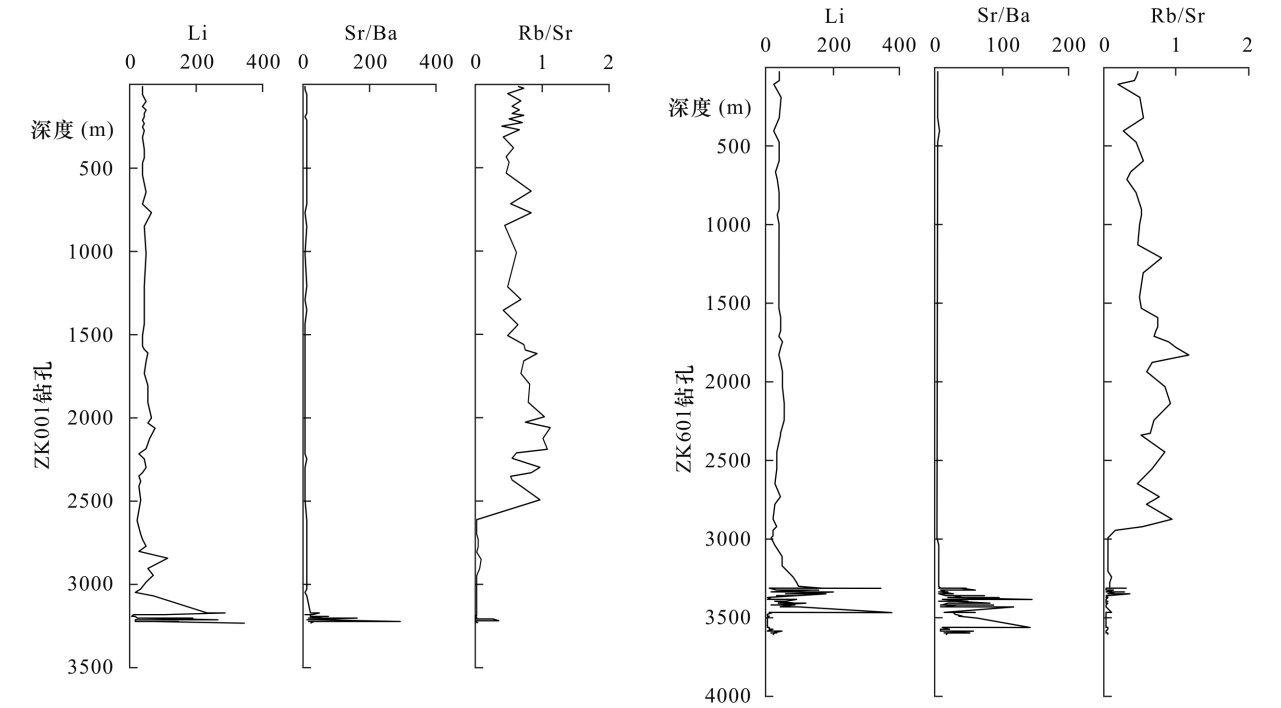


图 5 四川盆地黄金口钻孔 Rb/Sr、Sr/Ba 值及锂含量的深度变化
Fig. 5 Vertical variations of Rb/Sr, Sr/Ba and lithium in boreholes, Huangjinkou area in the Sichuan Basin

含量的变化规律相吻合, Sr/Ba 值由下至上降低表明沉积环境从海相沉积向陆相沉积的转变, 海、陆沉积环境的改变对锂元素的富集有着较大的影响。 Rb/Sr 值也与锂元素含量变化有一定关系, 但其一致程度不如 Sr/Ba 值, 表明物源的变化也会影响锂元素的含量。

碳酸盐岩是由盆地内水体直接提供沉积物质的内源沉积作用的产物, 其中各类元素主要来源于三个方面: 一是来源于陆壳风化产生的溶解物质; 二是来源于火山喷发溶液、气体及地壳深部物质; 三是来自成岩流体带入的各种元素。因此, 碳酸盐岩中某些元素可以作为盆地演化、环境变迁的指示剂^[37]。黄金口地区碳酸盐岩的稀土总量(ΣREE)平均值为 6.44 μg/g, 与我国陕南碳酸盐岩的 ΣREE 含量(3.98 ~ 13.06 μg/g)及安徽北部碳酸盐岩的 ΣREE 含量(7.945 ~ 26.09 μg/g)接近, 表明该区域碳酸盐岩在稀土总量上并不富集, 没有陆源碎屑的注入。这与上部砂泥岩的沉积条件有着明显差异, 表明了明显的沉积物源的变化。

因此认为, 黄金口地区锂元素的富集可能是由于沉积环境从海相变化为陆相, 在蒸发作用下不断浓缩的结果。期间, 沉积物源的改变可能进一步促进了锂的富集。这一发现为后续勘查提供了重要线索。

5 存在问题和发展展望

沉积型锂矿是一种重要的锂矿资源类型, 世界整体的开发程度较低, 具有很大的开发利用潜力。现阶段独立开发的沉积型锂矿的矿石类型以黏土岩型和凝灰岩型为主。锂提纯分离技术相对简单, 成本低, 主要采用硫酸常压浸出工艺, 提取率高, 产品以碳酸锂(Li₂CO₃)为主, 利润空间大。因此, 沉积型锂矿有望成为未来锂矿勘查、开发利用的重要方向。

现阶段已知的沉积型锂矿主要分布在勘查程度较高的美国西海岸, 主要由加拿大、美国、澳大利亚等国家的大型矿业公司开发, 非洲等勘查程度较低地区尚未发现沉积型锂矿。除塞尔维亚的贾达尔(Jadar)矿床外, 尚未有正式商业生产的沉积型锂矿, 主要处于勘查评估阶段。我国的沉积型锂矿以伴生为主, 品位较高, 潜在资源量巨大, 但对于锂的赋存状态尚不明确, 也没有大规模开发利用的先例。近年来在四川盆地东北部黄金口背斜, 通过 2 个 3000m 深钻, 发现了在三叠系雷口坡组的碳酸盐岩

和嘉陵江组的硬石膏中有锂的富集, 锂含量最高可达 103.25 μg/g。锂的富集机制可能是由于沉积相从海相向陆相的转变以及物源改变的联合作用的结果。黄金口高锂层位的发现, 为寻找沉积型锂矿提供了重要线索。

6 参考文献

[1] 王登红,王瑞江,付小方,等.对能源金属矿产资源基地调查评价基本问题的探讨——以四川甲基卡大型锂矿基地为例[J].地球学报,2016,37(4):471-480. Wang D H,Wang R J,Fu X F,et al. A discussion on the major problems related to geological investigation and assessment for energy metal resources base:A case study of the Jiajika large lithium mineral resource base[J]. Acta Geoscientica Sinica,2016,37(4):471-480.

[2] 王登红,孙艳,刘喜方,等.锂能源金属矿产深部探测技术与找矿方向[J].中国地质调查,2018,5(1):1-9. Wang D H,Sun Y,Liu X F,et al. Deep exploration technology and prospecting direction for lithium energy metal[J]. Geological Survey of China,2018,5(1):1-9.

[3] 刘丽君,王登红,刘喜方,等.国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状[J].中国地质,2017,44(2):263-278. Liu L J,Wang D H,Liu X F,et al. The main types, distribution features and present situation of exploration and development for domestic and foreign lithium mine[J]. Geology in China,2017,44(2):263-278.

[4] 李康,王建平.中国锂资源开发利用现状及对策建议[J].资源与产业,2016,18(1):82-86. Li K,Wang J P. China's lithium resource development actuality and approaches[J]. Resources & Industries,2016,18(1):82-86.

[5] 李建康,刘喜方,王登红.中国锂矿成矿规律概要[J].地质学报,2014,88(12):2269-2283. Li J K,Liu X F,Wang D H. The metallogenetic regularity of lithium deposit in China[J]. Acta Geologica Sinica,2014,88(12):2269-2283.

[6] Marquee Resources Ltd. Clayton Valley Lithium - Marquee Resources [EB/OL]. <http://www.marqueeresources.com.au/projects/clayton-valley-lithium/>. 2018.

[7] Li THIUM - X Ltd. Clayton Valley - LiTHIUM - X [EB/OL]. http://www.lithium-x.com/clayton_valley/. 2018.

[8] Cypress Development Corp. Clayton Valley Lithium Project, Nevada | Cypress Development Corp. [EB/OL]. <https://www.cypressdevelopmentcorp.com/projects/nevada/glory-lithium-project-nevada/>. 2018.

- [9] HotCopper. Big Sandy and Lordsburg Lithium Projects – HotCopper [EB/OL]. <https://hotcopper.com.au/documentdownload?id=uOMxKKzFkiWRTLKhOROKAxjvTDYC6w6%2ByhmZqOByke92GA%3D%3D>. 2018.
- [10] Zenith Minerals Ltd. Burro Creek USA – Zenith Minerals [EB/OL]. <http://www.zenithminerals.com.au/projects/burro-creek-usa/>. 2018.
- [11] Mining Atlas. Kings Valley [EB/OL]. <https://mining-atlas.com/project/Kings-Vally-Lithium-Mine-Project.php>. 2018.
- [12] Aimva. Kings Valley Lithium Project, Nevada USA NI 43 – 101 Technical Report [EB/OL]. <http://www.aimva.com.au/LiteratureRetrieve.aspx?ID=185311>. 2018.
- [13] Lithium Americas Ltd. Lithium Americas [EB/OL]. <http://www.lithiumamericas.com/thacker-pass/>. 2018.
- [14] Lithium Australia Ltd. Electra project – Lithium Australia [EB/OL]. <https://lithium-au.com/electra-project/>. 2018.
- [15] Bacanora Lithium Ltd. Sonora Lithium Bacanora Lithium [EB/OL]. <http://www.bacanoralithium.com/projects/sonora-lithium/>. 2018.
- [16] Plateau Energy Metals Ltd. Falchani Lithium Project – Plateau Energy Metals [EB/OL]. <http://plateaue-nergymetals.com/falchani-lithium-project/>. 2018.
- [17] 赵元艺,符家骏,李运. 塞尔维亚贾达尔盆地超大型锂硼矿床[J]. 地质论评, 2015, 61(1): 34–44.
Zhao Y Y, Fu J J, Li Y. Super large lithium and boron deposit in Jadar Basin, Serbia [J]. Geological Review, 2015, 61(1): 34–44.
- [18] Rio Tinto Ltd. Jadar – Rio Tinto [EB/OL]. <https://www.riotinto.com/energyandminerals/jadar-4643.aspx#>. 2018.
- [19] 张雪飞,郑绵平. 蒙古国 Khukh Del 侏罗系沉积锂、钾赋存状态研究[J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 55.
Zhang X F, Zheng M P. Study on the occurrence of lithium and potassium in Jurassic sediments in Khukh Del, Mongolia [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 55.
- [20] 王涛,赵晓东,李军敏,等. 重庆银矿垭口铝土矿锂的分布特征[J]. 地质找矿论丛, 2014, 29(4): 541–545.
Wang T, Zhao X D, Li J M, et al. Distribution characteristics of lithium in Yinkuangyakou bauxite deposit, Chongqing [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2014, 29(4): 541–545.
- [21] 褚光琛. 准格尔煤田煤中稀有金属富集机理的实验模拟[D]. 邯郸:河北工程大学, 2015.
Chu G C. Simulated Experiment on Enrichment Mechanism of Rare Metal in Coal of Jungar Coalfield [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2015.
- [22] 金中国,周家喜,黄智龙,等. 黔北务一—一道地区典型铝土矿床伴生有益元素锂、镓和钽分布规律[J]. 中国地质, 2015, 42(6): 1910–1918.
Jin Z G, Zhou J X, Huang Z L, et al. The distribution of associated elements Li, Sc and Ga in the typical bauxite deposits over the Wuchuan—Zheng'an—Daozhen bauxite ore district, Northern Guizhou province [J]. Geology in China, 2015, 42(6): 1910–1918.
- [23] 王登红,李沛刚,屈文俊,等. 贵州大竹园铝土矿中钨和锂的发现与综合评价[J]. 中国科学(地球科学), 2013, 43(1): 44–51.
Wang D H, Li P G, Qu W J, et al. Discovery and preliminary study of the high tungsten and lithium contents in the Dazhuyuan bauxite deposit, Guizhou, China [J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 56: 145–152.
- [24] Sun Y Z, Zhao C L, Qin S J, et al. Occurrence of some valuable elements in the unique ‘high – aluminium coals’ from the Jungar coalfield, China [J]. Ore Geology Reviews, 2016, 72: 659–668.
- [25] 衣姝,王金喜. 安家岭矿 9 号煤中锂的赋存状态和富集因素分析[J]. 煤炭与化工, 2014, 37(9): 7–10.
Yi S, Wang J X. Lithium occurrences and enrichment factor law in No. 9 coal seam of Anjialing mine [J]. Coal and Chemical Industry, 2014, 37(9): 7–10.
- [26] 李华,许霞,杨恺. 山西平朔矿区 4 号煤中锂、镓资源成矿地质特征研究 [J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(12): 17–19.
Li H, Xu X, Yang K. Lithium and gallium resources metallogenic geological characteristics in coal No. 4, Pingshuo mining area, Shanxi [J]. Coal Geology of China, 2014, 26(12): 17–19.
- [27] 刘帮军,林明月. 山西平朔矿区 9#煤中锂的富集机理及物源研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(8): 115–117.
Liu B J, Lin M Y. Enrichment mechanism and material sources of lithium in Li – bearing coal seam No. 9 from Pingshuo mining district of Shanxi Province [J]. Coal Technology, 2015, 34(8): 115–117.
- [28] 刘帮军,林明月. 宁武煤田平朔矿区 9 号煤中锂的富集机理[J]. 地质与勘探, 2014, 50(6): 1070–1075.
Liu B J, Lin M Y. Enrichment mechanism of lithium in coal seam No. 9 of the Pingshuo mining district, Ningwu coalfield [J]. Geology and Exploration, 2014, 50(6): 1070–1075.
- [29] 杨瑞东,程伟,高军波,等. 黔西南煤层中铌、钽、钒和锂元素富集与潜在资源评价[J]. 贵州地质, 2017, 34(2): 77–81.
Yang R D, Cheng W, Gao J B, et al. Nb, U, V and Li element enrichment of coal seams and potential resource evaluation in Southwest Guizhou [J]. Guizhou Geology, 2017, 34(2): 77–81.

[30] 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质,2009,36(1):1-28.
Pan G T,Xiao Q H,Lu S N,et al. Subdivision of tectonic units in China[J]. Geology of China, 2009, 36 (1): 1 - 28.

[31] 邓国仕,李军敏,杨桂花,等. 渝南水江板桥铝土矿区锂的分布规律及其影响因素研究[J]. 中国矿业,2014(3):72-79.
Deng G S,Li J M,Yang G H,et al. Distribution law of lithium and its influencing factors in Shuijiangbanqiao bauxite mining area, Southern Chongqing [J]. China Mining Magazine,2014(3):72-79.

[32] 迟清华. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京:地质出版社,2007.
Chi Q H. Applied Geochemical Elemental Abundance Data Sheet[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.

[33] 孙倩,贾玉连,申洪源,等. 内蒙古黄旗海全新世湖泊沉积物中 Rb、Sr 分布及其环境意义[J]. 古地理学报, 2010,12(4):444-450.
Sun Q, Jia Y L, Shen H Y, et al. Distribution and environmental implication of Rb, Sr in the Holocene lacustrine sediments of Huangqihai Lake, Inner Mongolia [J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12 (4): 444 - 450.

[34] 陈暘,陈骏,刘连文,等. 最近 13 万年来黄土高原 Rb/Sr 记录与夏季风时空变迁[J]. 中国科学(地球科学),2003,33(6):513-519.
Chen Y,Chen J,Liu L W,et al. The Rb/Sr record of the Loess Plateau and the temporal and spatial changes of the summer monsoon in the past 130000 years[J]. Scientia Sinica (Terrae),2003,33(6):513-519.

[35] 陈骏,安芷生. 最近 800ka 洛川黄土剖面中 Rb-Sr 分布和古季风变迁[J]. 中国科学(地球科学),1998,28(6):498-504.
Chen J, An Z S. Rb-Sr distribution and paleo-monsoon change in the recent 800ka Luochuan loess profile[J]. Scientia Sinica (Terrae),1998,28(6):498-504.

[36] 章桂芳,郑卓,Barry Rollet,等. 闽江钻孔沉积物微量元素地球化学研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015,35(2):81-90.
Zhang G F, Zheng Z, Rollet B, et al. Trace elements geochemistry of Min River core sediments[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2015,35(2):81-90.

[37] 刘建清,林家善,冯伟明,等. 四川盆地东南缘中上寒武统白云岩稀土元素特征及成因意义——以贵州毕节长树田剖面为例[J]. 矿物岩石,2014(1):87-94.
Liu J Q,Lin J S,Feng W M,et al. The REE geochemical characteristics of middle-upper cambrian dolomite in Southeast Sichuan Basin and its significance: A case study of Changshutian profile in Bijie, Guizhou [J]. Journal of Mineralogy and Petrology,2014(1):87-94.

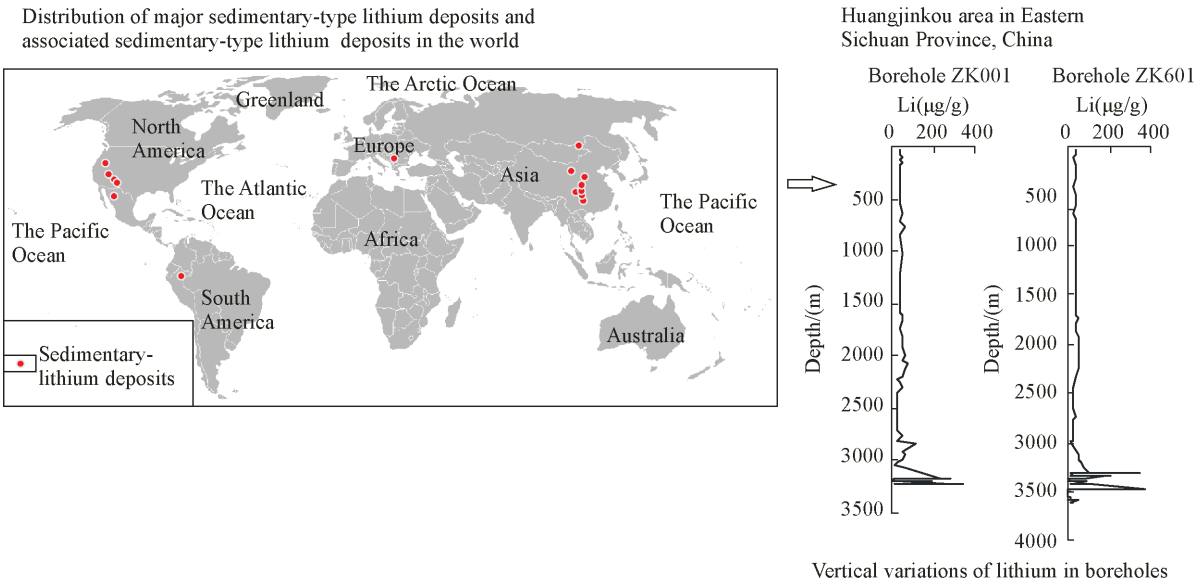
The Distribution and Exploration Status of Domestic and Foreign Sedimentary – type Lithium Deposits

YU Feng^{1,2}, WANG Deng – hong^{2*}, YU Yang², LIU Zhu³, GAO Juan – qin^{1,2}, ZHONG Jia – ai^{2,3}, QIN Yan²

- (1. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
- 2. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Natural Resources; Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
- 3. The 405 Geological Team, Sichuan Province Geology and Mineral Exploration and Development Bureau, Dujiangyan 611830, China)

HIGHLIGHTS

- (1) Review of the current status of exploration and development of major sedimentary – type lithium deposits in China and abroad.
- (2) Revealing of the characteristics of lithium content in the high – lithium strata of the Leikoupo Formation and the Jialingjiang Formation in Eastern Sichuan Province.
- (3) The enrichment of lithium may be the results of the dual effects of depositional environment changes and provenance changes.



ABSTRACT

BACKGROUND: With the increasing consumption of lithium resources in recent years, the boom of lithium exploration and development has grown worldwide. At present, three main types of lithium deposits have been explored and utilized in the world: brine – type, pegmatite – type and sedimentary – type. Among them, sedimentary – type lithium deposits have important geological significance and economic value due to their huge reserves.

OBJECTIVES: To understand the distribution and status of exploration and development for domestic and foreign sedimentary – type lithium deposits, and provide experience for the exploration of sedimentary – lithium deposits in China.

METHODS: The cores of borehole ZK001 and borehole ZK601 in the Huangjinkou area in Eastern Sichuan Province were continuously sampled and 196 samples were taken. Those samples were used to study lithium enrichment characteristics and depositional environment. Element content of samples was determined by Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry (ICP – MS).

RESULTS: Sedimentary – type lithium deposits were mainly distributed in North America, but a few were distributed in South America and Europe. The ore was mainly composed of clay minerals. The study of cores from Huangjinkou area revealed that lithium was mainly enriched in the anhydrite of the Jialingjiang Formation and the carbonate rocks of the Leikoupo Formation, with a maximum content of 103.25µg/g.

CONCLUSIONS: The enrichment of lithium in the two strata may be due to the dual effects of depositional environment changes and provenance changes, but the specific provenance and occurrence of lithium were still unclear and need further investigation. The discovery of high – lithium strata provide important clues for the exploration of sedimentary – type lithium deposits in the Sichuan Basin, and provide scientific basis for further study on the source, migration, enrichment and occurrence of lithium.

KEY WORDS: sedimentary – type lithium deposits; lithium mineralization clues; lithium – bearing clay; status of exploration and development; Huangjinkou